

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局(43) 国際公開日  
2004 年 1 月 15 日 (15.01.2004)

PCT

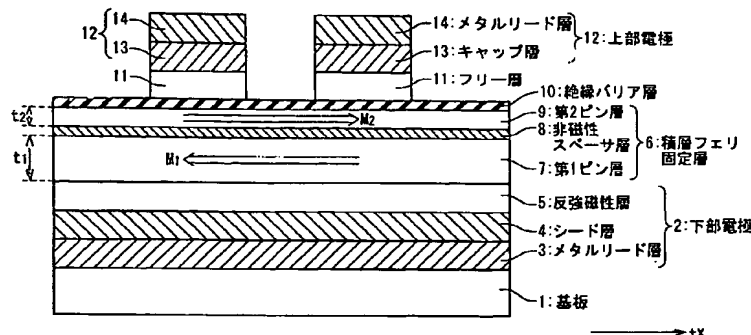
(10) 国際公開番号  
WO 2004/006335 A1

- (51) 国際特許分類<sup>7</sup>: H01L 27/105, 43/08, G11C 11/15 (72) 発明者; および  
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 松寺 久雄 (MAT-SUTERA, Hisao) [JP/JP]; 〒108-8001 東京都 港区 芝五丁目 7 番 1 号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP). 沼田 秀昭 (NUMATA, Hideaki) [JP/JP]; 〒108-8001 東京都 港区 芝五丁目 7 番 1 号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2003/008460
- (22) 国際出願日: 2003 年 7 月 3 日 (03.07.2003)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2002-200562 2002 年 7 月 9 日 (09.07.2002) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 日本電気株式会社 (NEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒108-8001 東京都 港区 芝五丁目 7 番 1 号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): AE, AG, AI, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CI, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI,

(続葉有)

(54) Title: MAGNETIC RANDOM ACCESS MEMORY

(54) 発明の名称: 磁気ランダムアクセスメモリ



- |                               |                                    |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 14...METAL LEAD LAYER         | 7...FIRST PIN LAYER                |
| 13...CAP LAYER                | 6...SUPERIMPOSED FERRI-FIXED LAYER |
| 12...UPPER ELECTRODE          | 5...ANTI-FERROMAGNETIC LAYER       |
| 11...FREE LAYER               | 4...SEED LAYER                     |
| 10...INSULATION BARRIER LAYER | 3...METAL LEAD LAYER               |
| 9...SECOND PIN LAYER          | 2...LOWER ELECTRODE                |
| 8...NON-MAGNETIC SPACER LAYER | 1...SUBSTRATE                      |

(57) Abstract: There is provided a technique to more effectively reduce the MRAM memory cell offset magnetic field. An MRAM includes a free layer (11) having reversible free spontaneous magnetization, a fixed layer (6) having fixed spontaneous magnetization, and a spacer layer (10) formed by a non-magnetic body and arranged between the free layer (11) and the fixed layer (6). The fixed layer (6) is formed in such a manner that the orange-peel effect and magnetostatic coupling effect are not applied to the free layer (11).

(57) 要約: MRAMのメモリセルのオフセット磁場をより効果的に減少させる技術を提供する。本発明によるMRAMは、反転可能な自由自発磁化を有するフリー層(11)と、固定自発磁化を有する固定層(6)と、非磁性体で形成され、前記フリー層(11)と前記固定層(6)との間に

(続葉有)



NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 *PCT* ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

介設されたスペーサ層 (10) とを備えている。固定層 (6) は、実質的に、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とをフリー層 (11) に及ぼさないように形成されている。

## 明細書

## 磁気ランダムアクセスメモリ

## 技術分野

- 5      本発明は、磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）に関する。本発明は、特に、MRAMのメモリセルに発生し得るオフセット磁場を解消するための技術に関する

## 背景技術

- 10      磁気ランダムアクセスメモリ（Magnetic Random Access Memory：以下、「MRAM」という。）は、高速書き込みが可能であり、且つ、大きな書き換え回数を有する不揮発性メモリとして注目を集めている。

- 15      典型的なMRAMのメモリセルは、図1に示されているように、固定された自発磁化を有するピン層101と、反転可能な自発磁化を有するフリー層102と、ピン層101とフリー層102との間に介設された非磁性のスペーサ層103とにより構成される磁気抵抗素子104を含む。フリー層102は、その自発磁化の向きが、ピン層101の自発磁化の向きと平行、又は反平行に向くことが許されるように、反転可能に形成される。

- 20      メモリセルは、1ビットのデータを、フリー層102の自発磁化の方向として記憶する。メモリセルは、フリー層102の自発磁化とピン層101の自発磁化とが平行である”平行”状態と、フリー層102の自発磁化とピン層101の自発磁化とが反平行である”反平行”状態の2つの状態を取り得る。メモリセルは、”平行”状態と、”反平行”状態とのうちの一方を”0”に、他方を”1”に対応付けることにより、1ビットのデータを記憶する。

- 25      メモリセルからのデータの読み出しは、磁気抵抗効果によるメモリセルの抵抗の変化を検知することによって行われる。ピン層101及びフリー層102の自発磁化の方向は、メモリセルの抵抗に影響を及ぼす。ピン層101とフリー層102との自発磁化の向きが平行である場合には、メモリセルの抵抗は、

第1値 $R$ となり、反平行である場合には、メモリセルの抵抗は、第2値 $R + \Delta R$ になる。ピン層101及びフリー層102の自発磁化の方向、即ち、メモリセルに記憶されているデータは、メモリセルの抵抗を検知することにより判別することができる。

- 5      メモリセルへのデータの書き込みは、メモリセルアレイに配設される信号線（典型的には、ワード線及びビット線）に電流を流し、該電流により生じる磁場によってフリー層102の自発磁化の方向を反転させることによって行われる。

- 10      フリー層102を構成する強磁性体は、本質的には（即ち、該強磁性体のバルクの性質としては）、印加磁場に対して対称な磁場-磁化特性（ $H-M$ 特性）を有するから、メモリセルの抵抗値は、理想的には、図2Aに示されているように、データの書き込みのために該メモリセルに印加される書き込み磁場に対して、対称的な特性を示す。

- 15      しかし、現実のメモリセルの抵抗値は、図2Bに示されているように、書き込み磁場に対して非対称な特性を示す、即ち、メモリがオフセット磁場 $H_{off}$ を有することがある。オフセット磁場 $H_{off}$ の存在は、データを書き込むために必要な磁場が、“1”と“0”とで異なることを意味している。オフセット磁場 $H_{off}$ は、メモリ動作余裕を小さくし、更に、データ書き込みに必要な電流を増加させるため好ましくない。

- 20      このオフセット磁場の発生の原因として、オレンジピール効果（Orange Peel Coupling, 又は Neel's coupling）が知られている。Kools等は、オレンジピール効果によるオフセット磁場の発生を、論文「J. C. S. Kools et al. "Effect of finite magnetic film thickness on Néel coupling in spin valves", J. Appl. Phys., 85, 4466 (1999)」に開示している。

- 25      図3に示されているように、オレンジピール効果は、ピン層101とフリー層102との表面の非平坦性に起因している。MRAMのメモリセルの製造工程において、ピン層101とフリー層102との表面は、實際上、完全に平坦化することは困難であり、ピン層101とフリー層102との表面は、現実には波打っている。ピン層101とフリー層102との波打ちは、ピン層101

とフリー層 102 との自発磁化の間に層間結合磁場 (Interlayer coupling field) を生じさせる。この層間結合磁場は、メモリセルがオフセット磁場を有する原因となる。

オフセット磁場の発生の他の原因として、静磁カップリング効果

- 5 (Magneto-Static coupling) が知られている。静磁カップリング効果は、フリンジ効果と呼ばれることがある。図 4 に示されているように、静磁カップリング効果は、ピン層 101 の端に磁極が生成されることに起因している。該磁極が発生する磁場  $H_{MS}$  は、フリー層 102 に印加され、従って、フリー層 102 の自発磁化が反転される反転磁場に非対称性が生じる。この反転磁場の非
- 10 対称性は、メモリセルがオフセット磁場を有する原因となる。

米国特許 No. 6, 233, 172 は、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とが、互いに逆の方向の磁場を発生させることを利用して、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とを相殺させることによってメモリセルのオフセット磁場をなくす技術を開示している。

- 15 図 5 は、上記の米国特許に開示されている MRAM のメモリセルの構造を示す。当該構造は、基板 112 と、下部電極積層膜 114 と、スペーサ層 116 と、上部電極積層膜 118 とを備えている。下部電極積層膜 114 は、ボトム層 120 と、反強磁性体層 122 と、ピン強磁性体層 124 と、ルテニウム層 126 と、固定強磁性体層 128 とにより構成されている。上部電極積層膜 1
- 20 18 は、フリー強磁性層 130 と保護層 132 とにより構成されている。ピン強磁性体層 124 と固定強磁性体層 128 とは、固定された自発磁化を有し、フリー強磁性層 130 は、反転可能な自発磁化を有している。

当該米国特許は、オレンジピール効果と静磁カップリング効果との相殺は、下記式：

- 25  $M_1 T_1 < M_2 T_2,$

を満足させることによって達成可能であることを開示している。ここで、 $T_1$  は、ピン強磁性体層 124 の膜厚であり、 $M_1$  は、ピン強磁性体層 124 の磁化である。更に、 $T_2$  は、固定強磁性体層 128 の膜厚であり、 $M_2$  は、固定強磁性体層 128 の磁化である。当該式は、

$T_1 < T_2$ , 且つ,  $M_1 = M_2$ ,  
 $T_1 = T_2$ , 且つ,  $M_1 < M_2$ , 又は,  
 $T_1 < T_2$ , 且つ,  $M_1 < M_2$

とすることによって成立され得る。

- 5      しかし、図6 A及び図6 Bに示されているように、静磁カップリング効果は、フリー層102の内部において、均一な効果ではない。図6 Bは、図6 Aに示されている形状を有する矩形のメモリセルについて、静磁カップリング効果によってフリー層102に印加される磁場の大きさを計算した結果を示している。フリー層102が受ける磁場は、ピン層101の端に近い位置で大きく、ピン層101の端から離れた位置で小さい。このように、フリー層102が受ける磁場は、均一でなく、メモリセルの内部の全体について、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とを相殺することは困難である。

- 更に、近年のMRAMの微細化の進展は、MRAMに含まれる多数のメモリセルのそれぞれについてオレンジピール効果と静磁カップリング効果とを相殺
- 15      することを困難にしている。MRAMの微細化に伴ってフリー層は薄くなり、従って、オレンジピール効果は増大する。更に、ピン層の大きさは小さくなり、静磁カップリング効果は増大する。オレンジピール効果と静磁カップリング効果との増大は、それぞれ、オレンジピール効果と静磁カップリング効果との大きさの製造バラツキを増大させ、従って、これらの効果のメモリセル毎のバラツキを増大させる。このバラツキの増大は、メモリセルのそれぞれについてオレンジピール効果と静磁カップリング効果とを相殺することを困難にし、MRAMのメモリセルアレイに含まれるメモリセルの全てについて、オフセット磁場を解消させることを妨げる。

- 公開特許公報（特開2000-332318及び特開平10-188235）
- 25      は、フリー層に印加される外部磁場を制御することにより、感度が高く、且つ信頼性が高い磁気ヘッドを提供するための磁気抵抗素子の構造を開示している。しかし、これらの文献は、磁気抵抗素子のフリー層のオフセット磁場をなくすことについて何ら言及していない。磁気ヘッドは、フリー層が適正なバイアスポイントにあることを要求するが、フリー層のオフセット磁場をなくす必要は

ない。

- このような背景から、メモリセルのオフセット磁場をより効果的に減少させる技術の提供が望まれている。特に、メモリセルの内部の全体について、オフセット磁場を均一に減少する技術や、製造バラツキに影響されずに、メモリセルのそれぞれについてオフセット磁場を解消することを可能にする技術の提供が望まれている。

### 発明の開示

- 本発明の目的は、MRAMのメモリセルのオフセット磁場をより効果的に減少させる技術を提供することにある。

本発明の他の目的は、MRAMのメモリセルの内部の全体について、オフセット磁場を均一に減少する技術を提供することにある。

本発明の更に他の目的は、MRAMの製造バラツキが、該MRAMのメモリセルのオフセット磁場の解消に与える悪影響を抑制する技術を提供することにある。

- 本発明の一の観点において、MRAMは、反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、固定自発磁化を有する固定層と、非磁性体で形成され、前記フリー層と前記固定層との間に介設されたスペーサ層とを備えている。固定層は、実質的に、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とをフリー層に及ぼさないように形成されている。当該MRAMは、そもそもオレンジピール効果と静磁カップリング効果とをフリー層に及ぼさないため、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とのバラツキや、メモリセル内の静磁カップリング効果の不均一性の問題が発生しない。

- 固定層は、前記固定自発磁化の方向である第1方向とは反対の第2方向に向けて磁化方向が固定された他の固定自発磁化を有する第1ピン層と、第1ピン層と前記フリー層との間に設けられ、且つ、前記固定自発磁化を有する第2ピン層とを含む場合がある。この場合、第1ピン層と第2ピン層の構造の最適化により、前記固定層が、実質的に、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とを前記フリー層に及ぼさないように形成されていることが好適である。

固定層がフリー層に及ぼすオレンジピール効果の抑制は、第1ピン層がオレ

ンジピール効果によって前記フリー層に加える第1磁場と、前記第2ピン層がオレンジピール効果によって前記フリー層に加える第2磁場との和が実質的に0であることにより効果的に達成され得る。

- 5 固定層が、更に、前記第1ピン層と前記第2ピン層との間に介設された非磁性の他のスペーサ層を含む場合、該他のスペーサ層は、前記固定自発磁化と前記他の固定自発磁化とが反強磁性的に結合するような膜厚を有することが好ましい。該他のスペーサ層は、前記固定自発磁化と前記他の固定自発磁化との方向を安定化し、当該MRAMの動作を安定化する。

- 10 また、固定層が、前記第1方向に延伸するように配設される場合、固定層の端とフリー層との距離は、端における磁極により生成される磁場が、フリー層に実質的に鎖交しない程度に大きいことが好ましい。静磁カップリング効果は、固定層の端において生成される磁極に起因するから、端とフリー層との距離が十分に大きくとられることは、固定層がフリー層に及ぼす静磁カップリング効果を効果的に抑制する。

- 15 本発明の他の観点において、MRAMは、反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、積層フェリ固定層と、非磁性体で形成され、フリー層と積層フェリ固定層との間に介設されたスペーサ層とを備えている。積層フェリ固定層は、第1方向に向けて固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、前記第1方向とは反対の第2方向に向けて固定された第2固定自発磁化を有する第2  
20 ピン層とを含む。第1ピン層は、前記第1方向に延伸するように配設された第1部分と、前記第1部分の上に、当該磁気ランダムアクセスメモリが形成される基板の表面に垂直な方向において、第2ピン層と位置整合(aligned)するように形成された第2部分とを備えている。第1ピン層と第2ピン層とは、積層フェリ固定層が、実質的に、オレンジピール効果をフリー層に及ぼさないように形成されている。更に、第1固定自発磁化の大きさを $M_1$ とし、前記第2固  
25 定自発磁化の大きさを $M_2$ とし、第2ピン層の厚さを $t_2$ としたとき、第2部分が実質的に $(M_2/M_1) \cdot t_2$ の厚さを有するように形成されている。このような厚さを有する第2部分は、第2ピン層の端における磁極が生成する磁場をキャンセルし、固定層が、フリー層に及ぼす静磁カップリング効果を効果的に抑



制する。

- 本発明の更に他の観点において、MRAMは、反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、積層フェリ固定層と、前記フリー層と前記積層フェリ固定層との間に介設される非磁性のスペーサ層とを備えている。積層フェリ固定層は、
- 5 第1方向に固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、前記フリー層と前記第1ピン層との間に挿入され、前記第1方向と反対の前記第2方向に固定された第2固定自発磁化を有する第2ピン層とを含む。第1ピン層と第2ピン層とは、第1ピン層がオレンジピール効果によって前記フリー層に与える第1磁場と、第2ピン層がオレンジピール効果によって前記フリー層に与える第
- 10 2磁場との和が実質的に0になるように形成されている。当該MRAMでは、第2ピン層がフリー層に与えるオレンジピール効果が、第1ピン層がフリー層に与えるオレンジピール効果によって相殺され、積層フェリ固定層は、実質的にオレンジピール効果をフリー層に与えない。オレンジピール効果の抑制により、当該MRAMは、メモリセルのオフセット磁場を効果的に抑制することが
- 15 できる。

- 積層フェリ固定層が、更に、前記第1ピン層と前記第2ピン層との間に介設された、非磁性の他のスペーサ層を含む場合、他のスペーサ層は、前記第1固定自発磁化と前記第2固定自発磁化とが反強磁性的に結合するような膜厚を有することが好ましい。
- 20 本発明の更に他の観点において、MRAMは、反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、第1方向に固定された固定自発磁化を有する固定層と、非磁性体で形成され、前記フリー層と前記固定層との間に介設されたスペーサ層とを備えている。前記固定層は、前記第1方向に延伸するように配設され、前記固定層の端と前記フリー層との距離は、前記端における磁極により生成される
- 25 磁場が、前記フリー層に実質的に鎖交しない程度に大きい。静磁カップリング効果は、固定層の端における磁極により生成される磁場に起因するから、前記固定層の端と前記フリー層との距離とを十分に大きくとることは、静磁カップリング効果を効果的に抑制する。

本発明の更に他の観点において、MRAMは、反転可能な自由自発磁化を有

- するフリー層と、積層フェリ固定層と、フリー層と積層フェリ固定層との間に介設される非磁性のスペーサ層とを備えている。積層フェリ固定層は、第1方向に固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、フリー層と第1ピン層との間に挿入され、前記第1方向と反対の前記第2方向に固定された第2固定自発磁化を有する第2ピン層とを含む。第1ピン層は、前記第1方向及び前記第2方向に延伸するように配設された第1部分と、第1部分の上に、当該磁気ランダムアクセスメモリが形成される基板の表面に垂直な方向において前記第2ピン層と位置整合するように形成された第2部分とを含む。前記第1固定自発磁化の大きさを $M_1$ とし、前記第2固定自発磁化の大きさを $M_2$ とし、第2ピン層の厚さを $t_2$ としたとき、第2部分は、実質的に $(M_2/M_1) \cdot t_2$ の厚さを有するように形成される。 $(M_2/M_1) \cdot t_2$ の厚さを有する第2部分は、第2ピン層が静磁カップリング効果によってフリー層に与える磁場と、ほぼ同じ大きさで、且つ、反対向きの磁場を静磁カップリング効果によって発生する。 $(M_2/M_1) \cdot t_2$ の厚さを有する第2部分は、第2ピン層がフリー層に与える静磁カップリング効果をキャンセルし、積層フェリ固定層がフリー層に及ぼす静磁カップリング効果を効果的に抑制する。

- 本発明の更に他の観点において、MRAMは、反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、積層フェリ固定層と、フリー層と積層フェリ固定層との間に介設される非磁性のスペーサ層とを備えている。積層フェリ固定層は、第1方向に固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、スペーサ層と第1ピン層との間に設けられ、前記第1方向と反対の第2方向に固定された第2固定自発磁化を有する第2ピン層とを含む。前記第1固定自発磁化の大きさと、前記第2固定自発磁化の大きさと、前記第1ピン層の膜厚と、前記第2ピン層の膜厚とは、前記積層フェリ固定層がオレンジピール効果によって前記フリー層に与える磁場の大きさと、前記積層フェリ固定層が静磁カップリング効果によって前記フリー層に与える磁場との大きさが、いずれも、10 (Oe) 以下であるように定められている。当該MRAMは、第1ピン層及び第2ピン層の最適化により、そもそもオレンジピール効果と静磁カップリング効果とをフリー層に及ぼさないように設計されている。ゆえに、当該MRAMには、オレンジ

ピール効果と静磁カップリング効果とのバラツキや、メモリセル内の静磁カップリング効果の不均一性の問題が発生しない。

- 本発明の更に他の観点において、MRAMは、反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、積層フェリ固定層と、フリー層と積層フェリ固定層との間に介設される非磁性のスペーサ層とを備えている。積層フェリ固定層は、第1方向に固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、前記スペーサ層と前記第1ピン層との間に設けられ、前記第1方向と反対の第2方向に固定された第2固定自発磁化を有する第2ピン層とを含む。第1固定自発磁化の大きさ $M_1$ と、前記第2固定自発磁化の大きさ $M_2$ と、前記第1ピン層の膜厚 $t_1$ と、前記第2ピン層の膜厚 $t_2$ とは、下記式：

$$\frac{M_1 \cdot t_1}{M_2 \cdot t_2} > 1$$

- が成立するように定められている。このように、第1固定自発磁化の大きさ $M_1$ と、前記第2固定自発磁化の大きさ $M_2$ と、前記第1ピン層の膜厚 $t_1$ と、前記第2ピン層の膜厚 $t_2$ とを定めることは、オレンジピール効果を効果的に抑制する。

当該MRAMの製造工程を簡素化するためには、第1ピン層と第2ピン層とは、同一の材料で形成され、前記 $M_1$ と前記 $M_2$ とは、実質的に等しいことが好ましい。

また、下記式：

$$M_1 > M_2$$

が成立することは、オレンジピール効果を実質的に0にすることを可能にする点で好適である。

- 以上の構成は、スペーサ層が、非磁性体、且つ、絶縁体である材料で形成され、スペーサ層の厚さは、厚さ方向にトンネル電流が流れる程度に薄い場合に、即ち、MTJがメモリセルに使用される場合に特に好適である。なぜなら、MTJがメモリセルに使用される場合、スペーサ層の膜厚が薄く、オレンジピール効果の影響が大きい。上記のMRAMの構成は、MTJが使用され、従って、

オレンジピール効果が高いメモリセルのオフセット磁場を効果的に抑制可能である。

以上に説明されているように、本発明は、MRAMのメモリセルのオフセット磁場をより効果的に減少させる。

- 5      また、本発明は、MRAMのメモリセルの内部の全体について、オフセット  
磁場を均一に減少する。

また、本発明は、MRAMの製造バラツキが、該MRAMのメモリセルのオフセット磁場の解消に与える悪影響を抑制する。

10 図面の簡単な説明

図1は、従来のMRAMを示す断面図である；

図 2 A は、理想的なメモリセルの抵抗の特性を示す；

図 2 B は、現実のメモリセルの抵抗の特性を示す；

図3は、オレンジピール効果によるオフセット磁場を示す；

- 15 図4は、静磁カップリング効果によるオフセット磁場を示す；

図5は、従来のMRAMを示す断面図である；

図 6 A 及び 6 B は、静磁カップリング効果によるオフセット磁場のメモリセル内での不均一性を説明する図である；

図7は、本発明によるMRAMの実施の第1形態を示す断面図である；

- 20 図8は、本発明によるMRAMの実施の第1形態を示す平面図である；

図9は、オレンジピール効果によるオフセット磁場を示すグラフである；

図10は、第1ピン層7がフリー層11に及ぼすオレンジピール効果を説明する図である；

図11は、本発明によるMRAMの実施の第2形態を示す断面図である；

- 25 図12は、本発明によるMRAMの実施の第2形態を示す平面図である；そ  
して

図13は、本発明によるMRAMの実施の第2形態を示す拡大断面図である。

### 発明を実施するための最良の形態

以下、添付図面を参照しながら、本発明によるMRAMの実施の形態を説明する。

(実施の第1形態)

- 5 図7は、本発明の実施の第1形態のMRAMの構造を示している。当該構造の理解を助けるために、図7に示されているMRAMの構造の縦横の比率は、実際のMRAMの比率と異なっていることに留意されたい。

実施の第1形態のMRAMは、基板1と下部電極2とを備えている。下部電極2は、基板1の上に形成されている。下部電極2は、メタルリード層3、シード層4、及び反強磁性層5を含む。メタルリード層3は、典型的には、Al、又はCuで形成される。シード層4は、典型的には、Ta膜、又は、Ta膜とRu膜の積層膜で形成される。反強磁性層5は、反強磁性体、典型的には、FeMn、IrMn、又はPtMnで形成される。

- 15 下部電極2の上に、積層フェリ固定層6が形成されている。積層フェリ固定層6は、第1ピン層7と、第2ピン層9と、これらの間に介設されている非磁性体スペーサ層8とを含む。第1ピン層7と、第2ピン層9とは、強磁性体で形成され、従って、それぞれに自発磁化を有している。第1ピン層7と、第2ピン層9とは、典型的には、CoFe、NiFe、又はNiFeCoで形成される。非磁性体スペーサ層8は、導電性の非磁性体、典型的には、Ruで形成される。

- 20 第1ピン層7は、反強磁性層5の上に形成され、第1ピン層7が有する自発磁化は、第1ピン層7と反強磁性層5との間の交換結合により、-x方向に向けて固定される。既述のシード層4は、反強磁性層5と第1ピン層7との間の交換結合特性を改善する作用を有している。良好な交換結合特性を得るためには、反強磁性層5と第1ピン層7との形成後に、数百エルステッド以上の磁場の中で、交換結合が消失するブロッキング温度以上の温度で熱処理が行われることが好ましい。反強磁性膜5としてIrMnが用いられる場合、250～300℃で、1時間の熱処理が行われることが好ましい。

第2ピン層9が有する自発磁化は、第1ピン層7と第2ピン層9との間の反

強磁性的な交換結合により、+x方向に向けられて固定される。第1ピン層7と第2ピン層9とが有する自発磁化の向きは逆である。第1ピン層7と第2ピン層9との間の反強磁性的な交換結合を強くするために、非磁性体スペーサ層8の膜厚は、10 Å以下に抑えられる。

- 5      このような構成を有する積層フェリ固定層6の特性を良好にするためには、積層フェリ固定層6の形成の後、10000エルステッド以上の磁場中で、250～300℃の温度で熱処理が行われることが好ましい。

積層フェリ固定層6の第2ピン層9の上には、絶縁バリア層10が形成される。絶縁バリア層10は、典型的には、酸化アルミニウム( $Al_2O_3$ )で形成  
10      される。絶縁バリア層10は、膜厚方向に(即ち、基板1に垂直な方向に)トンネル電流が流れるように薄く形成される。絶縁バリア層10の膜厚は、典型的には、1～5 nmである。

図8に示されているように、下部電極2、積層フェリ固定層6、及び絶縁バリア層10は、x軸方向に延伸するように配設される。

- 15      図7に示されているように、絶縁バリア層10の上には、複数のフリー層11が形成される。フリー層11は、強磁性体で形成され、従って、自発磁化を有している。フリー層11の自発磁化は、反転可能である。フリー層11は、x軸方向に細長くなるように形成され、フリー層11の自発磁化は、+x方向、及び-x方向に向くことが許されている。フリー層11は、積層フェリ固定層  
20      6の端に生成される磁極6a、6bが発生する磁場が、フリー層11を実質的に鎖交しないように、積層フェリ固定層6の端6a、6bから十分に離される。

一のフリー層11と、絶縁バリア層10と、積層フェリ固定層6の第2ピン層9とは、それぞれにMTJ (Magnetic Tunnel Junction) を形成し、一のMTJは、一のメモリセルとして使用される。メモリセルに書き込まれるデータは、フリー層11の自発磁化の向きとして記憶される。TMR効果(Tunnel  
25      Magneto-Resistance 効果)により、フリー層11の自発磁化の向き、即ち、メモリセルに書き込まれるデータは、MTJの抵抗(即ち、メモリセルの抵抗)に影響を及ぼす。MTJの抵抗の変化を利用して、メモリセルに記憶されているデータが判別される。

複数のフリー層 11 の上には、上部電極 12 がそれぞれに形成される。上部電極 12 は、キャップ層 13 とメタルリード層 14 とを含む。キャップ層 13 は、典型的には、Ta で形成され、メタルリード層 14 は、典型的には、Al, Cu で形成される。

- 5 本実施の形態の MRAM は、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とを互いに相殺するのではなく、積層フェリ固定層 6 がフリー層 11 に及ぼすオレンジピール効果と静磁カップリング効果との両方を積極的に小さくし、実質的に 0 にすることによって、メモリセルのオフセット磁場を解消する。オレンジピール効果と静磁カップリング効果とによってフリー層 11 に印加される磁場が小さい、又は、実質的に 0 であることは、オレンジピール効果と静磁カップリング効果のバラツキに起因するメモリセルのオフセット磁場の発生の問題を効果的に解消する。
- 10

- 積層フェリ固定層 6 がフリー層 11 に与えるオレンジピール効果を実質的に 0 にすることは、第 2 ピン層 9 がフリー層 11 に与えるオレンジピール効果を、第 1 ピン層 7 がフリー層 11 に与えるオレンジピール効果で相殺することによって達成されている。それぞれの非平坦性に起因して、第 1 ピン層 7 と第 2 ピン層 9 とは、それぞれに、オレンジピール効果をフリー層 11 に与える。第 1 ピン層 7 と第 2 ピン層 9 とが有する自発磁化は逆方向を向いているから、第 1 ピン層 7 と第 2 ピン層 9 とがオレンジピール効果によって与える磁場は、逆向きである。従って、第 1 ピン層 7 と第 2 ピン層 9 とがオレンジピール効果によってフリー層 11 に与える磁場の大きさを実質的に一致させることにより、積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 11 に与える磁場を実質的に 0 にすることが可能である。
- 15
- 20

- 第 2 ピン層 9 がフリー層 11 に与えるオレンジピール効果の、第 1 ピン層 7 がフリー層 11 に与えるオレンジピール効果による相殺は、第 1 ピン層 7 の磁化  $M_1$ 、第 1 ピン層 7 の膜厚  $t_1$ 、第 2 ピン層 9 の磁化  $M_2$ 、及び第 2 ピン層 9 の膜厚  $t_2$  との間の関係の最適化によって達成される。好適な磁化  $M_1$ 、 $M_2$ 、及び膜厚  $t_1$ 、 $t_2$  の関係が以下で導かれる。
- 25

一の強磁性体膜が受けるオレンジピール効果は、該一の強磁性体膜と該オレ

ンジピール効果を及ぼす他の強磁性体膜との距離が近い程大きく、且つ、該他の強磁性体膜の磁化が大きいほど大きい。従って、第2ピン層9よりもフリー層11から離れている第1ピン層7の磁化 $M_1$ を、第2ピン層9の磁化 $M_2$ よりも大きくすることによって、第1ピン層7と第2ピン層9とがオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場の大きさを一致させ、積層フェリ固定層6がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場を実質的に0にすることができる。

第1ピン層7の磁化 $M_1$ を、第2ピン層9の磁化 $M_2$ よりも大きくすることは、オレンジピール効果の抑制の観点では好ましいが、MRAMの製造プロセスを簡素化する観点からは好ましくない。MRAMの製造プロセスを簡素化するためには、第1ピン層7と第2ピン層9とを同一の材料で形成することが好適であり、この場合、第1ピン層7の磁化 $M_1$ と第2ピン層9の磁化 $M_2$ とは、実質的に一致することになる。

しかし、第1ピン層7の磁化 $M_1$ と第2ピン層9の磁化 $M_2$ とが実質的に一致する場合でも、第1ピン層7の膜厚 $t_1$ と、第2ピン層9の膜厚 $t_2$ とを最適化することにより、積層フェリ固定層6がフリー層11に与えるオレンジピール効果を抑制し、実質的に0にすることが可能である。以下では、その理論的考察が行われる。

J. C. S. Kools等は、上述の従来技術で言及した論文において、2つの強磁性体膜が周期的に波打っている系においてオレンジピール効果によって発生するオフセット磁場 $H_{off}$ を算出し、開示している。Kools等のモデルによると、該オフセット磁場 $H_{off}$ は、近似的に、下記式：

$$H_{off} = \frac{2\pi^2 h^2 M_P}{\sqrt{2}\lambda t_P} \cdot \exp\left(-2\pi \frac{\sqrt{2}t_{MO}}{\lambda}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-2\pi \frac{\sqrt{2}t_P}{\lambda}\right)\right] \cdot \left[1 - \exp\left(-2\pi \frac{\sqrt{2}t_P}{\lambda}\right)\right], \quad \dots(1)$$

によって算出される。ここで、 $h$ は、強磁性体膜が波打つ振幅、 $\lambda$ は、強磁性



- 体膜が波打つ周期、 $t_F$ は、オレンジピール効果を受ける強磁性体膜の膜厚、 $t_{AO}$ は、強磁性体膜の間に介設される非磁性膜の膜厚、 $t_P$ は、オレンジピール効果を与える強磁性体膜の膜厚、 $M_P$ は、オレンジピール効果を与える強磁性体膜の磁化である。Koo1s等のモデルを積層フェリ固定層6に適用できるように
- 5 拡張すると、フリー層11が積層フェリ固定層6からオレンジピール効果によって受けるオフセット磁場の大きさ $H_{OFF}$ は、下記式：

$$H_{OFF} = \frac{2\pi^2 h^2 M_P}{\sqrt{2} \lambda t_F} \cdot \left[ \exp\left(-2\pi \frac{\sqrt{2} t_{AO}}{\lambda}\right) \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-2\pi \frac{\sqrt{2} t_2}{\lambda}\right) \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-2\pi \frac{\sqrt{2} t_F}{\lambda}\right) \right\} - \exp\left\{-2\pi \frac{\sqrt{2}(t_{AO} + t_2 + t_R)}{\lambda}\right\} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-2\pi \frac{\sqrt{2} t_1}{\lambda}\right) \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-2\pi \frac{\sqrt{2} t_F}{\lambda}\right) \right\} \right] \cdots (2)$$

- で表される。ここで、 $h$ は、第1ピン層7、第2ピン層9、及びフリー層11が波打つ振幅、 $\lambda$ は、これらの層が波打つ周期、 $t_R$ は、非磁性体スペーサ層8の膜厚、 $t_P$ は、フリー層11の膜厚、 $t_{AO}$ は、絶縁バリア層10の膜厚、 $t_1$ は、第1ピン層7の膜厚、 $t_2$ は、第2ピン層9の膜厚、 $M_P$ は、第1ピン層7及び第2ピン層9の磁化の大きさであり、 $M_1$ 及び $M_2$ に等しい。
- 10

- 図9は、第2ピン層9の厚さ $t_2$ をパラメータとして、 $t_1/t_2$ とオフセット磁場の大きさ $H_{OFF}$ との関係を示すグラフである。但し、該グラフは、 $h$ は、7Å、 $\lambda$ は180Å、 $t_{AO}$ は、15Åとして作成されている。図9に示されているように、 $t_2$ が10Å以下とし、 $t_1/t_2$ を約4.5にすることにより、フリー層11が積層フェリ固定層6からオレンジピール効果によって受けるオフセット磁場の大きさ $H_{OFF}$ を実質的に0にすることが可能である。他の条件においても、第1ピン層7の膜厚 $t_1$ と、第2ピン層9の膜厚 $t_2$ とを最適化することにより、オレンジピール効果によるオフセット磁場の大きさ $H_{OFF}$ を実質的に0にすることが可能である。
- 15
- 20

但し、MRAMの設計上の他の要因により、積層フェリ固定層6がフリー層

- 1 1 に及ぼすオレンジピール効果を実質的に 0 にすることが好適でない場合があり得る。この場合でも、積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与える磁場は、積極的に減少されることが好ましい。積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与える磁場は、10
- 5 (Oe) 以下に抑制されることが好適である。積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与える磁場を、10 (Oe) 以下にすることは、第 1 ピン層 7 の磁化  $M_1$ 、第 1 ピン層 7 の膜厚  $t_1$ 、第 2 ピン層 9 の磁化  $M_2$ 、及び第 2 ピン層 9 の膜厚  $t_2$  との間の関係を最適化することによって達成することが可能である。
- 10 より詳細には、積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与える磁場は、 $M_1/M_2$  を大きくすることによって減少することが可能である。既述の通り、第 1 ピン層 7 と第 2 ピン層 9 とがそれぞれ有する自発磁化の向きは逆であり、且つ、第 1 ピン層 7 は、フリー層 1 1 からの距離が第 2
- 15 ピン層 9 よりも遠い。オレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与えられる磁場の大きさは、オレンジピール効果を作用させる強磁性体膜とフリー層 1 1 との距離が大きいほど小さから、 $M_1$  を  $M_2$  よりも大きくすることにより、即ち、 $M_1/M_2$  を大きくすることによって積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与える磁場を小さくすることができる。
- 更に、積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与
- 20 える磁場は、 $t_1/t_2$  を増加することによって減少させることも可能である。図 10 は、その理由を説明する図である。第 2 ピン層 9 の膜厚  $t_2$  が小さいほど、第 1 ピン層 7 と第 2 ピン層 9 とがオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与える磁場の大きさは近い値になる。既述の通り、第 1 ピン層 7 と第 2 ピン層 9 とがオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与える磁場の向きは反対で
- 25 あるから、第 2 ピン層 9 の膜厚  $t_2$  が小さいほど、積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に与える磁場は、小さくなる。
- 一方、第 1 ピン層 7 の膜厚  $t_1$  が大きいほど、第 2 ピン層 9 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に加える磁場を、第 1 ピン層 7 がオレンジピール効果によってフリー層 1 1 に加える磁場によって打ち消す効果は大きくなる。そ

の理由は以下の通りである。第2ピン層9がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場 $H_2$ は、第2ピン層9が非磁性スペーサ層8に接合する界面に発生する磁極が生成する磁場と、第2ピン層9が絶縁バリア層10に接合する界面に発生する磁極が生成する磁場との合成磁場である。後者の磁場の方が強いため、合成磁場 $H_2$ の向きは、第2ピン層9が有する自発磁化の向きに一致する。

一方、第1ピン層7がオレンジピール効果によってフリー層11に加える磁場は、

- (1) 第1ピン層7が反強磁性層5に接合する界面7aに発生する磁極 $m_{1b}$ ,
- 10 (2) 第1ピン層7が非磁性スペーサ層8に接合する界面7bに発生する磁極 $m_{1t}$

によって発生される。磁極 $m_{1t}$ が発生する磁場 $H_{1t}$ は、第2ピン層9がフリー層11にオレンジピール効果によって与える磁場 $H_2$ を打ち消す作用を有する一方、磁極 $m_{1b}$ が発生する磁場 $H_{1b}$ は、磁場 $H_2$ と同一の方向であり、フリー層11のオフセット磁場を増加する作用を有する。従って、磁極 $m_{1b}$ が発生する磁場 $H_{1b}$ は、フリー層11に印加されることが望ましい。第1ピン層7の膜厚 $t_1$ が大きいほど、磁極 $m_{1b}$ がフリー層11に印加する磁場 $H_{1b}$ は小さくなり、ゆえに、第2ピン層9がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場を打ち消す磁極 $m_{1t}$ の作用が強くなる。従って、第2ピン層9がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場を、第1ピン層7がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場によって打ち消す効果は、第1ピン層7の膜厚 $t_1$ が大きいほど大きくなる。

このように、第1ピン層7の膜厚 $t_1$ が大きく、第2ピン層9の膜厚 $t_2$ が小さい程、即ち、 $t_1/t_2$ が大きいほど、積層フェリ固定層6がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場は、小さくなる。

$M_1/M_2$ と $t_1/t_2$ とが、それぞれに大きいほど、積層フェリ固定層6がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場を小さくすることができるが、 $M_1/M_2$ と $t_1/t_2$ とは、下記式：

$$\frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{t_1}{t_2} > 1 \quad \dots(3)$$

が成立する程度に大きくされることが好適である。式（３）が成立する程度に  $M_1/M_2$  と  $t_1/t_2$  とが大きくされることにより、積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 11 に与える磁場を効果的に小さくすることができる。

- このとき、上述と同様に、MRAMの製造プロセスを簡素化するためには、第 1 ピン層 7 と第 2 ピン層 9 とを同一の材料で形成することが好適である。この場合、第 1 ピン層 7 の磁化  $M_1$  と第 2 ピン層 9 の磁化  $M_2$  とは、実質的に一致することになる。 $M_1$  と  $M_2$  とが実質的に一致される場合、第 1 ピン層 7 の膜厚  $t_1$  を第 2 ピン層 9 の膜厚  $t_2$  よりも大きくすることによって、即ち、 $t_1 > t_2$  とすることによって、式（３）を成立させることが可能である。

- 一方、積層フェリ固定層 6 が、静磁カップリング効果によってフリー層 11 に加える磁場の抑制は、図 8 に示されているように、積層フェリ固定層 6 を、十分に x 軸方向に十分に長く延設し、フリー層 11 を積層フェリ固定層 6 の端 6 a, 6 b から十分に離れるようにすることによって達成されている。フリー層 11 は、積層フェリ固定層 6 の端 6 a, 6 b に生成される磁極が発生する磁場がフリー層 11 を実質的に鎖交しない程度に、積層フェリ固定層 6 の端 6 a, 6 b から離される。静磁カップリング効果は、端 6 a, 6 b に生成される磁極によって引き起こされるから、積層フェリ固定層 6 の端 6 a, 6 b をフリー層 11 から十分に離すことにより、積層フェリ固定層 6 がフリー層 11 に及ぼす静磁カップリング効果を実質的に 0 にすることができる。

- 但し、MRAMの設計上の他の要因により、積層フェリ固定層 6 がフリー層 11 に及ぼす静磁カップリング効果を実質的に 0 にすることが好適でない場合が有り得る。この場合でも、積層フェリ固定層 6 が、静磁カップリング効果によってフリー層 11 に与える磁場が積極的に小さくされ、好適には、10 (Oe) 以下にされることが好ましい。積層フェリ固定層 6 の端 6 a, 6 b とフリー層 11 との距離を適切に大きくすることにより、積層フェリ固定層 6 が、静

磁カップリング効果によってフリー層 11 に与える磁場を 10 (Oe) 以下にすることは容易に実現可能である。

- 以上に説明されているように、本実施の形態のMRAMでは、積層フェリ固定層 6 に含まれる第 1 ピン層 7 の磁化  $M_1$ 、及び膜厚  $t_1$ 、並びに第 2 ピン層 9 の磁化  $M_2$ 、及び膜厚  $t_2$  の最適化により、積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果によってフリー層 11 に与える磁場の大きさが実質的に 0 にされ、又は、10 (Oe) 以下にされる。更に、積層フェリ固定層 6 の端 6a、6b をフリー層 11 から充分に離すことにより、積層フェリ固定層 6 が静磁カップリング効果によってフリー層 11 に与える磁場の大きさが実質的に 0 にされ、又は、10 (Oe) 以下にされる。これらにより、メモリセルのオフセット磁場が、効果的に減少されている。積層フェリ固定層 6 がオレンジピール効果と静磁カップリング効果とによってフリー層 11 に及ぼす磁場がそれぞれに小さくされているから、製造バラツキによる影響は少なく、更に、メモリセルの内部における不均一性も抑制される。

15

#### (実施の第 2 形態)

図 11 は、本発明によるMRAMの実施の第 2 形態を示す。理解を容易にするために、図 11 に示されているMRAMの構造の縦横の比率は、実際のMRAMと異なっていることに留意されたい。

- 20 実施の第 2 形態のMRAMでは、実施の第 1 形態の積層フェリ固定層 6 と異なる構造を有する積層フェリ固定層 6' により、オレンジピール効果と静磁カップリング効果との抑制が行われている。

- 25 実施の第 2 形態のMRAMに採用される積層フェリ固定層 6' は、一の第 1 ピン層 7' と、複数の非磁性体スペーサ層 8' と、非磁性体スペーサ層 8' の上にそれぞれに形成されている第 2 ピン層 9' とを含む。第 1 ピン層 7' と第 2 ピン層 8' とは、強磁性体で形成され、従って、それぞれに自発磁化を有している。第 1 ピン層 7' と、第 2 ピン層 9' とは、典型的には、CoFe, NiFe, 又はNiFeCoで形成される。非磁性体スペーサ層 8' は、導電性の非磁性体、典型的には、Ruで形成される。

第1ピン層7'は、反強磁性層5の上に形成され、第1ピン層7'が有する自発磁化は、第1ピン層7と反強磁性層5との間の交換結合により、-x方向に向けて固定される。第2ピン層9'が有する自発磁化は、第1ピン層7'と第2ピン層9'との間の反強磁性的な交換結合により、+x方向に向けられて固定される。第1ピン層7'と第2ピン層9'とが有する自発磁化の向きは逆である。

第1ピン層7'は、反強磁性層5の上に形成されている第1部分7a'と、第2部分7b'とから構成されている。第1部分7a'は、x軸方向に延伸するように配設され、第1部分7a'の端は、フリー層11から充分に離されて形成されている。

第1部分7a'の上には、複数の第2部分7b'が設けられる。第2ピン層9'のそれぞれに対して一の第2部分7b'が設けられる。第2部分7b'の上には、非磁性体スペーサ層8'が形成され、非磁性体スペーサ層8'の上には、第2ピン層9'が形成される。第2ピン層9'の上には、絶縁バリア層10、フリー層11、及び上部電極12が順次に形成される。

第2部分7b'、非磁性体スペーサ層8'、第2ピン層9'、絶縁バリア層10、フリー層11、及び上部電極12は、自己整合的にエッチングされて形成されている。従って、基板1の表面に垂直な方向からみて、第2ピン層9'と第2部分7b'とは、同一の形状を有し、且つ、位置整合している。

実施の第2形態でも、実施の第1形態のMRAMと同様に、積層フェリ固定層6'がフリー層11に及ぼすオレンジピール効果と静磁カップリング効果とを積極的に小さくし、実質的に0にすることによって、メモリセルのオフセット磁場が抑制され、解消されている。

積層フェリ固定層6'がフリー層11に及ぼすオレンジピール効果の抑制は、実施の第1形態と同様に、第1ピン層7'の膜厚 $t_1$ 及び磁化 $M_1$ 、並びに、第2ピン層9'の膜厚 $t_2$ 及び磁化 $M_2$ の最適化により達成されている。ここで、実施の第2形態の第1ピン層7'の膜厚 $t_1$ とは、第1部分7a'の膜厚 $t_{1a}$ と、第2部分7b'の膜厚 $t_{1b}$ との和を意味する。積層フェリ固定層6'がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場は、積極的に減少され、

好適には10(Oe)以下に、最も好適には、実質的に0に抑制される。

既述のように、 $M_1 > M_2$ とすることにより、又は、 $M_1 = M_2$ とする場合でも、膜厚 $t_1$ 、 $t_2$ を最適化することにより、積層フェリ固定層6'がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場は、実質的に0にすることが可能で

5 ある。

更に、積層フェリ固定層6'がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場が実質的に0にされない場合には、式(3)が成立するように、第1ピン層7'の膜厚 $t_1$ 及び磁化 $M_1$ 、並びに、第2ピン層9'の膜厚 $t_2$ 及び磁化 $M_2$ が定められることにより、積層フェリ固定層6'がオレンジピール効果  
10 によってフリー層11に与える磁場が抑制される。製造工程の簡便化の観点から第1ピン層7'と第2ピン層9'とに同一の材料が採用され、磁化 $M_1$ 、 $M_2$ が実質的に同一にされる場合には、 $t_1 > t_2$ が成立するように、第1ピン層7'の膜厚 $t_1$ と第2ピン層9'の膜厚 $t_2$ とが定められる。

一方、静磁カップリング効果の抑制は、第1ピン層7'の第1部分7a'と  
15 第2部分7b'との構造の最適化によって行われる。図12に示されているように、第1部分7a'は、第1部分7a'の端7c'、7d'がフリー層11から充分に離れるように、x軸方向に長く延設される。より詳細には、第1部分7a'の端7c'、7d'は、端7c'、7d'に生成される磁極が発生する磁場が、フリー層11を実質的に鎖交しないように、フリー層11から充分に離  
20 される。

第2部分7b'は、図13に示されているように、第2ピン層9'がフリー層11に及ぼす静磁カップリング効果を、第2部分7b'がフリー層11に及ぼす静磁カップリング効果によって相殺するように形成される。より具体的には、第2部分7b'の膜厚 $t_{1t}$ は、実質的に $(M_2/M_1) \cdot t_2$ に一致するように形成される。このように膜厚 $t_{1t}$ が定められた第2部分7b'は、第2ピン層9'がフリー層11に及ぼす静磁カップリング効果を相殺し、これにより、  
25 積層フェリ固定層6'が静磁カップリング効果によってフリー層11に及ぼす磁場を実質的に0にすることを可能にする。第2部分7b'の端7e'、7f'に生成される磁極が発生する磁場 $H_{1tc}$ の大きさは、 $M_1 \cdot t_{1t}$ に比例する。一

方、第2ピン層9'の端9a'、9b'に生成される磁極が発生する磁場 $H_{2c}$ の大きさは、 $M_2 \cdot t_2$ に比例する。既述のように、磁化 $M_1$ と磁化 $M_2$ との向きは逆であるから、磁場 $H_{11c}$ と磁場 $H_{2c}$ との向きも逆である。従って、第2部分7b'の膜厚 $t_{1t}$ を $(M_2/M_1) \cdot t_2$ に実質的に一致させることにより、磁場 $H_{11c}$ と磁場 $H_{2c}$ との大きさを実質的に一致させ、これにより、第2ピン層9'がフリー層11に及ぼす静磁カップリング効果を、第2部分7b'がフリー層11に及ぼす静磁カップリング効果によって相殺することが可能である。

上記のように第1部分7a'と第2部分7b'との構造を最適化することにより、積層フェリ固定層6'が静磁カップリング効果によってフリー層11に与える磁場を実質的に0にすることができる。積層フェリ固定層6'が静磁カップリング効果によってフリー層11に与える磁場が実質的に0にされない場合でも、第2部分7b'の膜厚 $t_{1t}$ を $(M_2/M_1) \cdot t_2$ の近傍に定めることにより、積層フェリ固定層6'が静磁カップリング効果によってフリー層11に与える磁場を容易に10 (Oe) 以下にすることができる。

以上に説明されているように、実施の第2形態のMRAMでは、積層フェリ固定層6'に含まれる第1ピン層7'の磁化 $M_1$ 、及び膜厚 $t_1$ 、並びに第2ピン層9'の磁化 $M_2$ 、及び膜厚 $t_2$ の最適化により、積層フェリ固定層6'がオレンジピール効果によってフリー層11に与える磁場の大きさが実質的に0にされ、又は、10 (Oe) 以下にされる。更に、第1ピン層7'の第1部分7a'と第2部分7b'との構造の最適化により、積層フェリ固定層6'が静磁カップリング効果によってフリー層11に与える磁場の大きさが実質的に0にされ、又は、10 (Oe) 以下にされる。これらにより、メモリセルのオフセット磁場が、効果的に減少されている。積層フェリ固定層6'がオレンジピール効果と静磁カップリング効果とによってフリー層11に及ぼす磁場がそれぞれに小さくされているから、製造バラツキによる影響は少なく、更に、メモリセルの内部における不均一性も抑制される。



### 請求の範囲

1. 反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、  
固定自発磁化を有する固定層と、  
5 非磁性体で形成され、前記フリー層と前記固定層との間に介設されたスペーサ層  
とを備え、  
前記固定層は、実質的に、オレンジピール効果と静磁カップリング効果とを  
前記フリー層に及ぼさない  
10 磁気ランダムアクセスメモリ。
2. 請求の範囲第1項に記載の磁気ランダムアクセスメモリにおいて、  
前記固定層は、  
前記固定自発磁化の方向である第1方向とは反対の第2方向に向けて磁化方  
15 向が固定された他の固定自発磁化を有する第1ピン層と、  
前記第1ピン層と前記フリー層との間に設けられ、且つ、前記固定自発磁化  
を有する第2ピン層  
とを含み、  
前記第1ピン層と前記第2ピン層とは、前記固定層が、実質的に、オレンジ  
20 ピール効果と静磁カップリング効果とを前記フリー層に及ぼさないように形成  
されている  
磁気ランダムアクセスメモリ。
3. 請求の範囲第2項に記載の磁気ランダムアクセスメモリにおいて、  
25 前記第1ピン層がオレンジピール効果によって前記フリー層に加える第1磁  
場と、前記第2ピン層がオレンジピール効果によって前記フリー層に加える第  
2磁場との和が実質的に0である  
磁気ランダムアクセスメモリ。

4. 請求の範囲第2項に記載の磁気ランダムアクセスメモリにおいて、  
前記固定層は、更に、前記第1ピン層と前記第2ピン層との間に介設された  
非磁性のスペーサ層を含み、  
前記スペーサ層は、前記固定自発磁化と前記他の固定自発磁化とが反強磁性  
5 的に結合するような膜厚を有する  
磁気ランダムアクセスメモリ。
5. 請求の範囲第2項に記載の磁気ランダムアクセスメモリにおいて、  
前記固定層は、前記第1方向に延伸するように配設され、  
10 前記固定層の端と前記フリー層との距離は、前記端における磁極により生成  
される磁場が、前記フリー層に実質的に鎖交しない程度に大きい  
磁気ランダムアクセスメモリ。
6. 反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、  
15 積層フェリ固定層と、  
非磁性体で形成され、前記フリー層と前記積層フェリ固定層との間に介設さ  
れたスペーサ層  
とを備え、  
前記積層フェリ固定層は、  
20 第1方向に向けて固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、  
前記第1方向とは反対の第2方向に向けて固定された第2固定自発磁化を有  
する第2ピン層  
とを含み、  
前記第1ピン層は、  
25 前記第1方向に延伸するように配設された第1部分と、  
前記第1部分の上に、当該磁気ランダムアクセスメモリが形成される基板の  
表面に垂直な方向において、前記第2ピン層と位置整合するように形成された  
第2部分  
とを備え、

前記第1ピン層と前記第2ピン層とは、前記積層フェリ固定層が、実質的に、オレンジピール効果を前記フリー層に及ぼさないように形成され、

- 前記第1固定自発磁化の大きさを $M_1$ とし、前記第2固定自発磁化の大きさを $M_2$ とし、前記第2ピン層の厚さを $t_2$ としたとき、前記第2部分が実質的に $(M_2/M_1) \cdot t_2$ の厚さを有することにより、前記積層フェリ固定層は、静磁カップリング効果を前記フリー層に及ぼさないように形成された磁気ランダムアクセスメモリ。

7. 反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、  
10 積層フェリ固定層と、  
前記フリー層と前記積層フェリ固定層との間に介設される非磁性のスペーサ層  
とを備え、  
前記積層フェリ固定層は、  
15 第1方向に固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、  
前記フリー層と前記第1ピン層との間に設けられ、前記第1方向と反対の第2方向に固定された第2固定自発磁化を有する第2ピン層  
とを含み、  
前記第1ピン層がオレンジピール効果によって前記フリー層に与える第1磁  
20 場と、前記第2ピン層がオレンジピール効果によって前記フリー層に与える第2磁場との和が実質的に0である  
磁気ランダムアクセスメモリ。

8. 請求の範囲第7項に記載の磁気ランダムアクセスメモリにおいて、  
25 前記積層フェリ固定層は、更に、前記第1ピン層と前記第2ピン層との間に設けられた、非磁性の他のスペーサ層を含み、  
前記他のスペーサ層は、前記第1固定自発磁化と前記第2固定自発磁化とが反強磁性的に結合するような膜厚を有する  
磁気ランダムアクセスメモリ。

9. 反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、  
第1方向に固定された固定自発磁化を有する固定層と、  
非磁性体で形成され、前記フリー層と前記固定層との間に介設されたスペーサ層
- 5 とを備え、  
前記固定層は、前記第1方向に延伸するように配設され、  
前記固定層の端と前記フリー層との距離は、前記端における磁極によりが生成される磁場が、前記フリー層に実質的に鎖交しない程度に大きい  
磁気ランダムアクセスメモリ。
- 10
10. 反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、  
積層フェリ固定層と、  
前記フリー層と前記積層フェリ固定層との間に介設される非磁性のスペーサ層
- 15 とを備え、  
前記積層フェリ固定層は、  
第1方向に固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、  
前記フリー層と前記第1ピン層との間に設けられ、前記第1方向と反対の第2方向に固定された第2固定自発磁化を有する第2ピン層
- 20 とを含み、  
前記第1ピン層は、  
前記第1方向及び前記第2方向に延伸するように配設された第1部分と、  
前記第1部分の上に、当該磁気ランダムアクセスメモリが形成される基板の表面に垂直な方向において前記第2ピン層と位置整合するように形成された第
- 25 2部分  
とを含み、  
前記第1固定自発磁化の大きさを $M_1$ とし、前記第2固定自発磁化の大きさを $M_2$ とし、前記第2ピン層の厚さを $t_2$ としたとき、  
前記第2部分は、実質的に $(M_2/M_1) \cdot t_2$ の厚さを有する

磁気ランダムアクセスメモリ。

- 1 1. 反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、  
積層フェリ固定層と、
- 5 前記フリー層と前記積層フェリ固定層との間に介設される非磁性のスペーサ層  
とを備え、  
前記積層フェリ固定層は、  
第1方向に固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、
- 10 前記スペーサ層と前記第1ピン層との間に設けられ、前記第1方向と反対の  
第2方向に固定された第2固定自発磁化を有する第2ピン層  
とを含み、  
前記第1固定自発磁化の大きさと、前記第2固定自発磁化の大きさと、前記  
第1ピン層の膜厚と、前記第2ピン層の膜厚とは、前記積層フェリ固定層がオ  
15 レンジピール効果によって前記フリー層に与える磁場の大きさと、前記積層フ  
ェリ固定層が静磁カップリング効果によって前記フリー層に与える磁場との大  
きさが、いずれも、10 (Oe) 以下であるように定められた  
磁気ランダムアクセスメモリ。
- 20 1 2. 反転可能な自由自発磁化を有するフリー層と、  
積層フェリ固定層と、  
前記フリー層と前記積層フェリ固定層との間に介設される非磁性のスペーサ  
層  
とを備え、
- 25 前記積層フェリ固定層は、  
第1方向に固定された第1固定自発磁化を有する第1ピン層と、  
前記スペーサ層と前記第1ピン層との間に設けられ、前記第1方向と反対の  
第2方向に固定された第2固定自発磁化を有する第2ピン層  
とを含み、

前記第 1 固定自発磁化の大きさ  $M_1$  と、前記第 2 固定自発磁化の大きさ  $M_2$  と、  
前記第 1 ピン層の膜厚  $t_1$  と、前記第 2 ピン層の膜厚  $t_2$  とは、下記式：

$$\frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{t_1}{t_2} > 1$$

が成立するように定められた

5 磁気ランダムアクセスメモリ。

1 3. 請求の範囲第 1 2 項に記載の磁気ランダムアクセスメモリにおいて、  
前記  $M_1$  と前記  $M_2$  とは、実質的に等しい  
磁気ランダムアクセスメモリ。

10

1 4. 請求の範囲第 1 2 項に記載の磁気ランダムアクセスメモリにおいて、  
前記第 1 ピン層と前記第 2 ピン層とは、同一の材料で形成されている  
磁気ランダムアクセスメモリ。

15 1 5. 請求の範囲第 1 2 項に記載の磁気ランダムアクセスメモリにおいて、  
下記式：

$$M_1 > M_2,$$

が成立する

磁気ランダムアクセスメモリ。

20

1 6. 請求の範囲第 1 項から第 1 5 項までのいずれかーに記載の磁気ランダ  
ムアクセスメモリにおいて、

前記スペーサ層は、非磁性体、且つ、絶縁体である材料で形成され、

前記スペーサ層の厚さは、厚さ方向にトンネル電流が流れる程度に薄い

25 磁気ランダムアクセスメモリ。

図 1

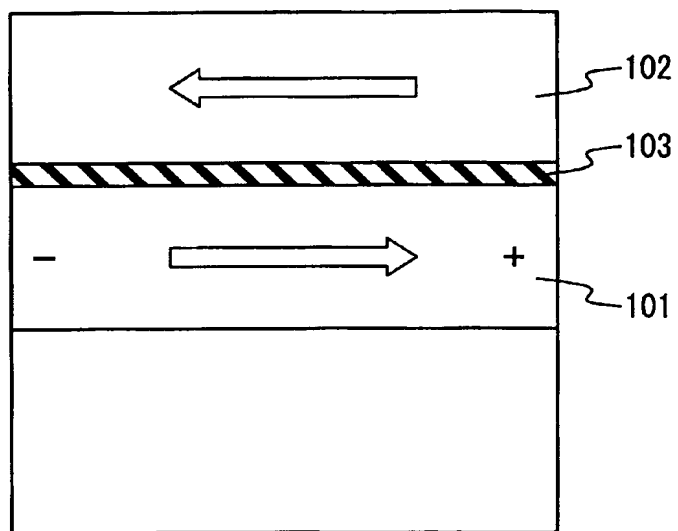


図 2A

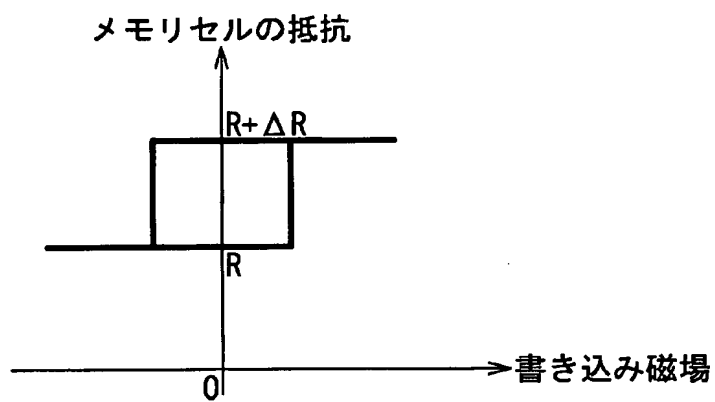


図 2B

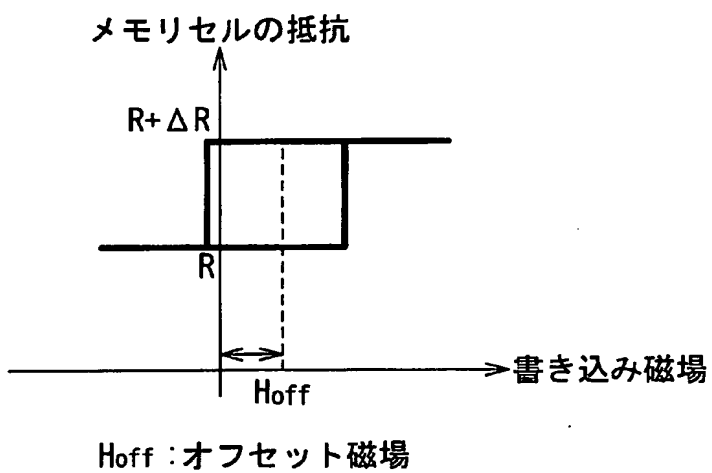




図 3

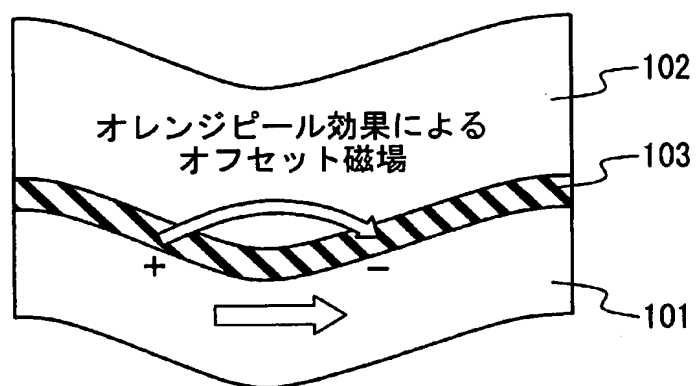


図 4

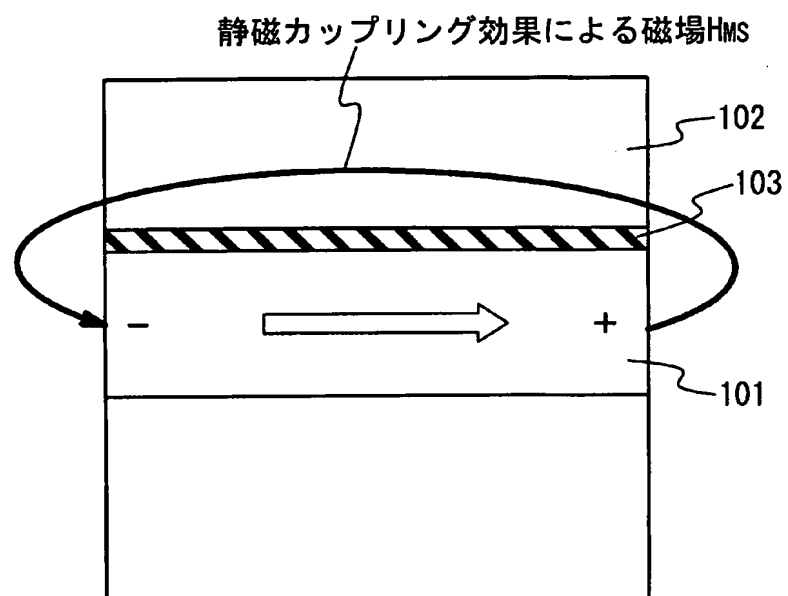


図 5

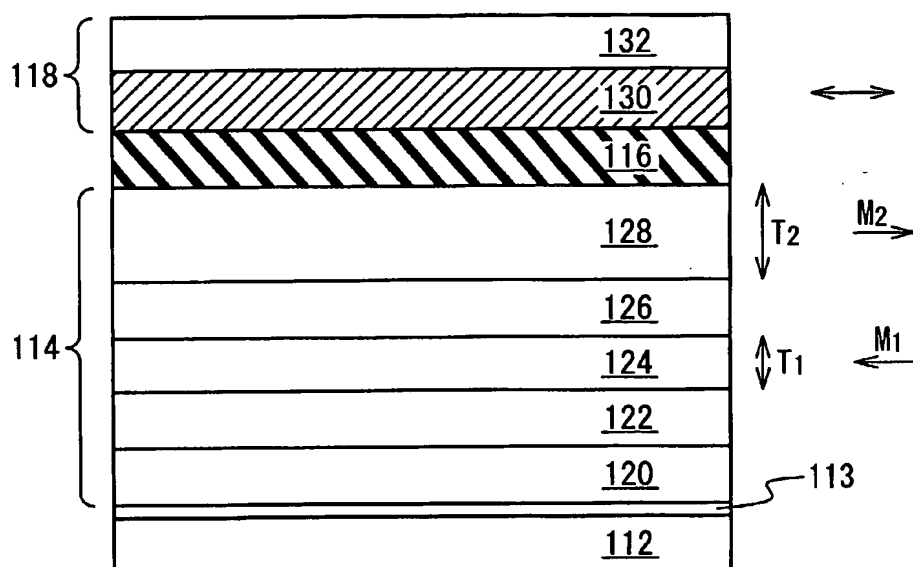


図 6A

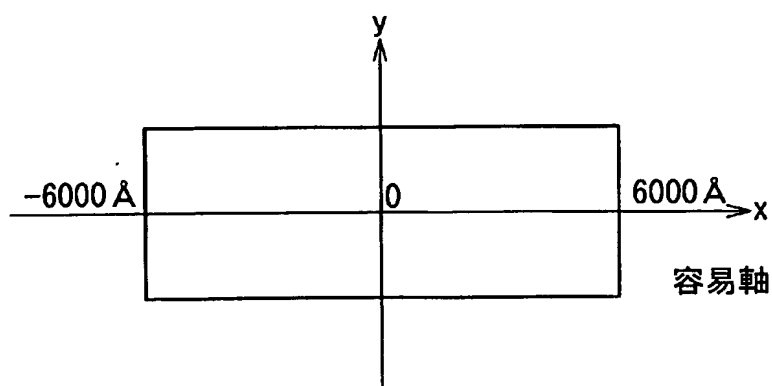


図 6B

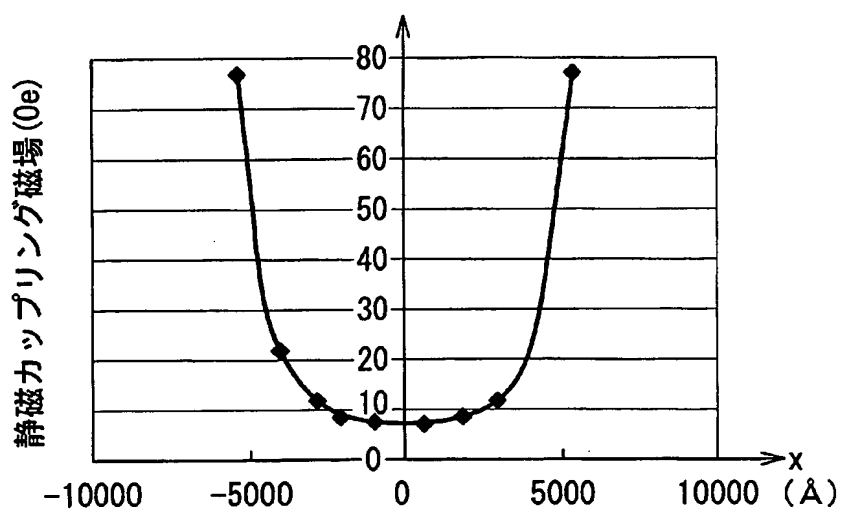


図7

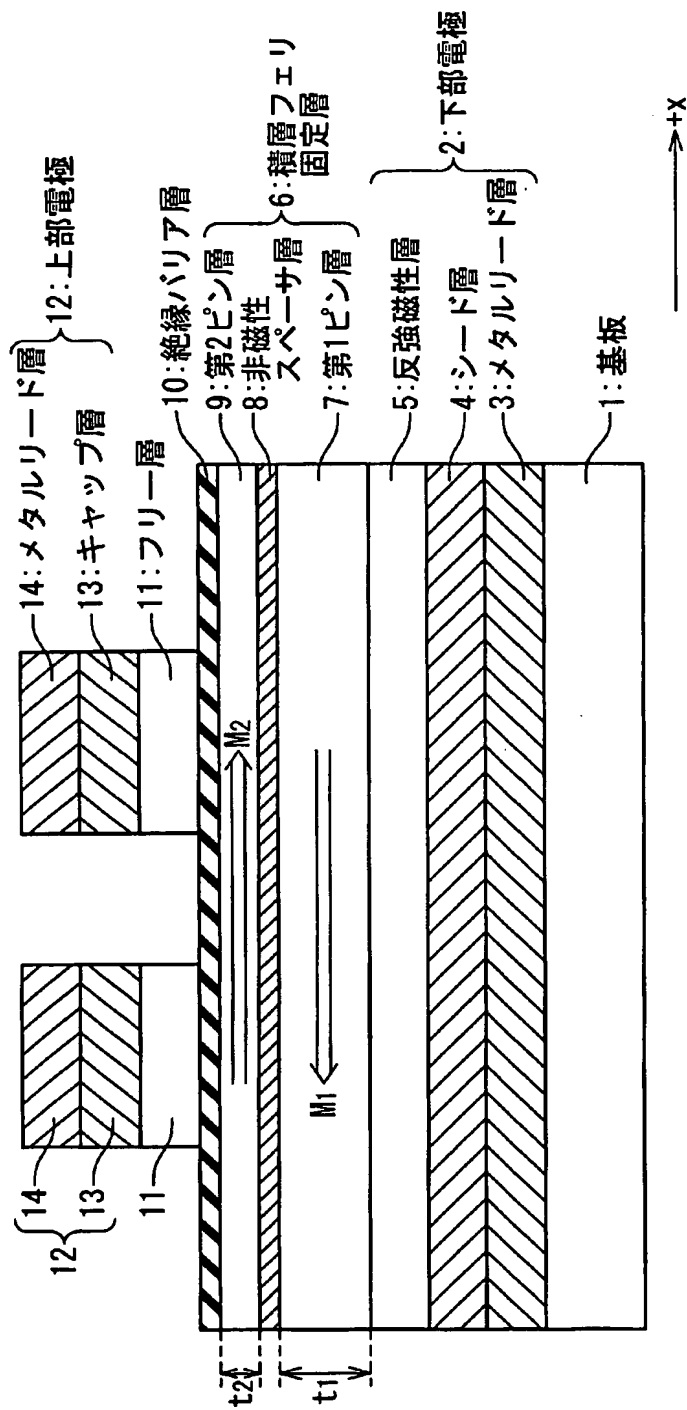


図 8

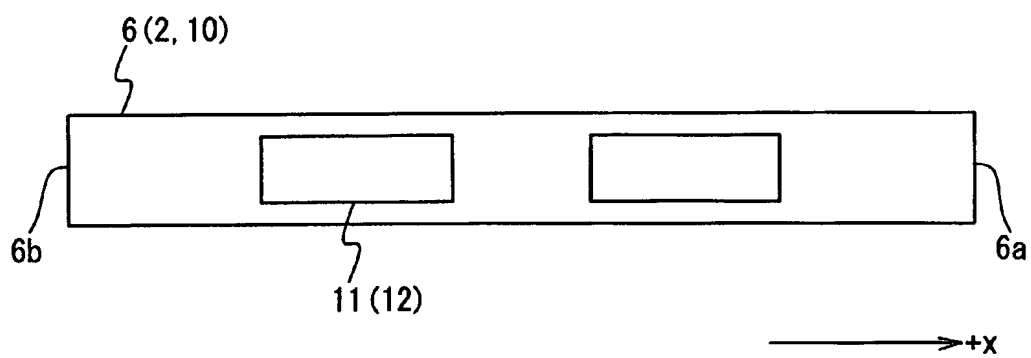
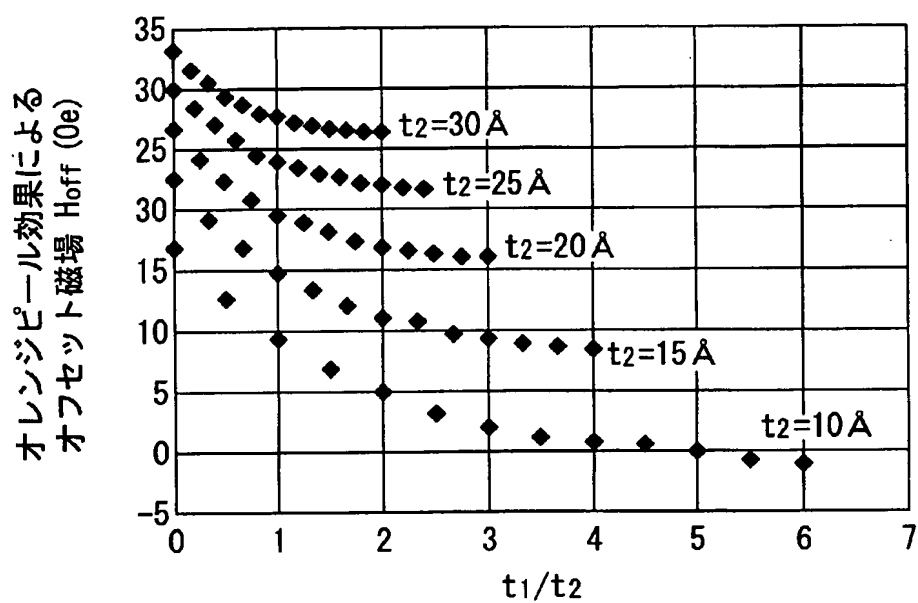


図 9



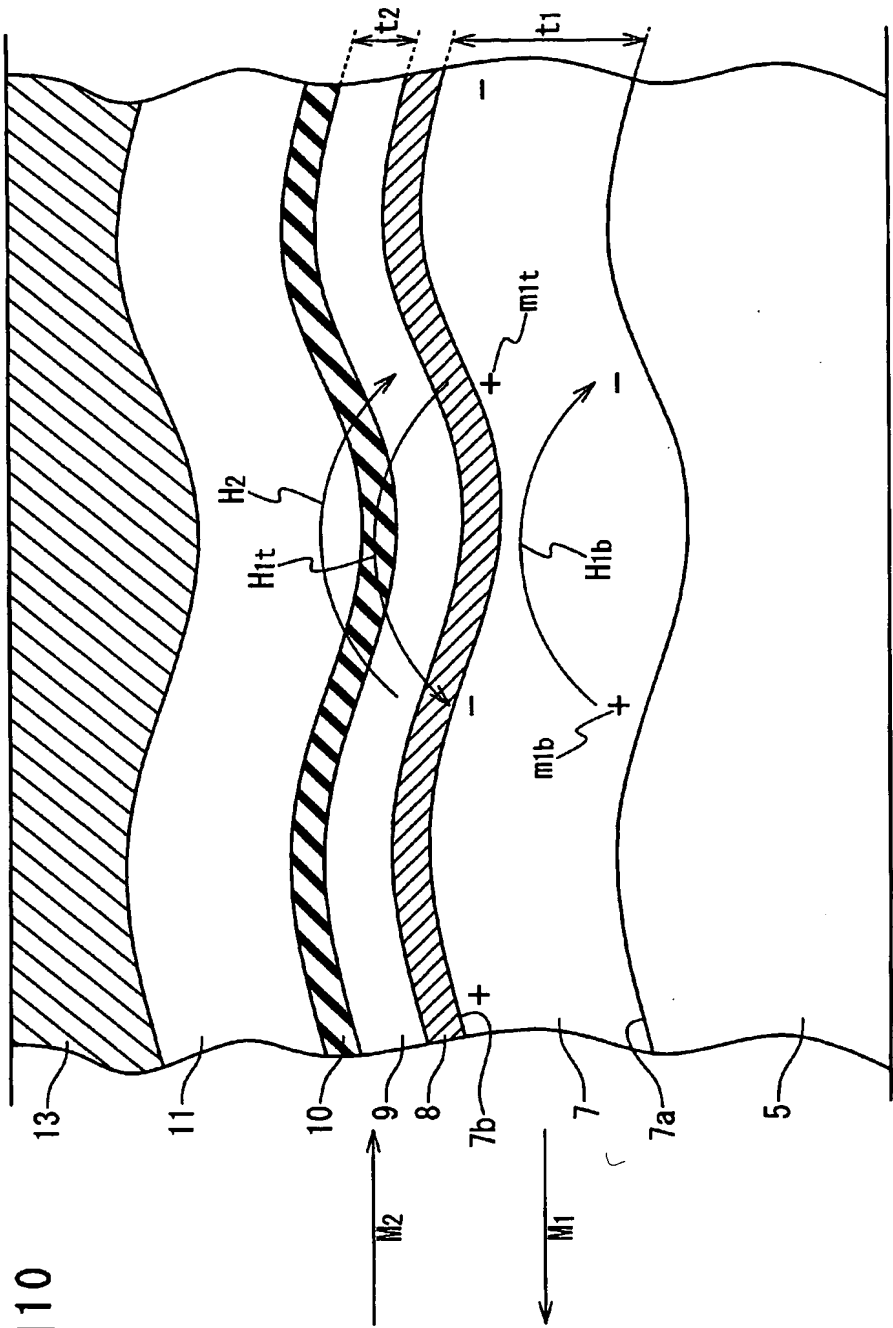


図10



図11

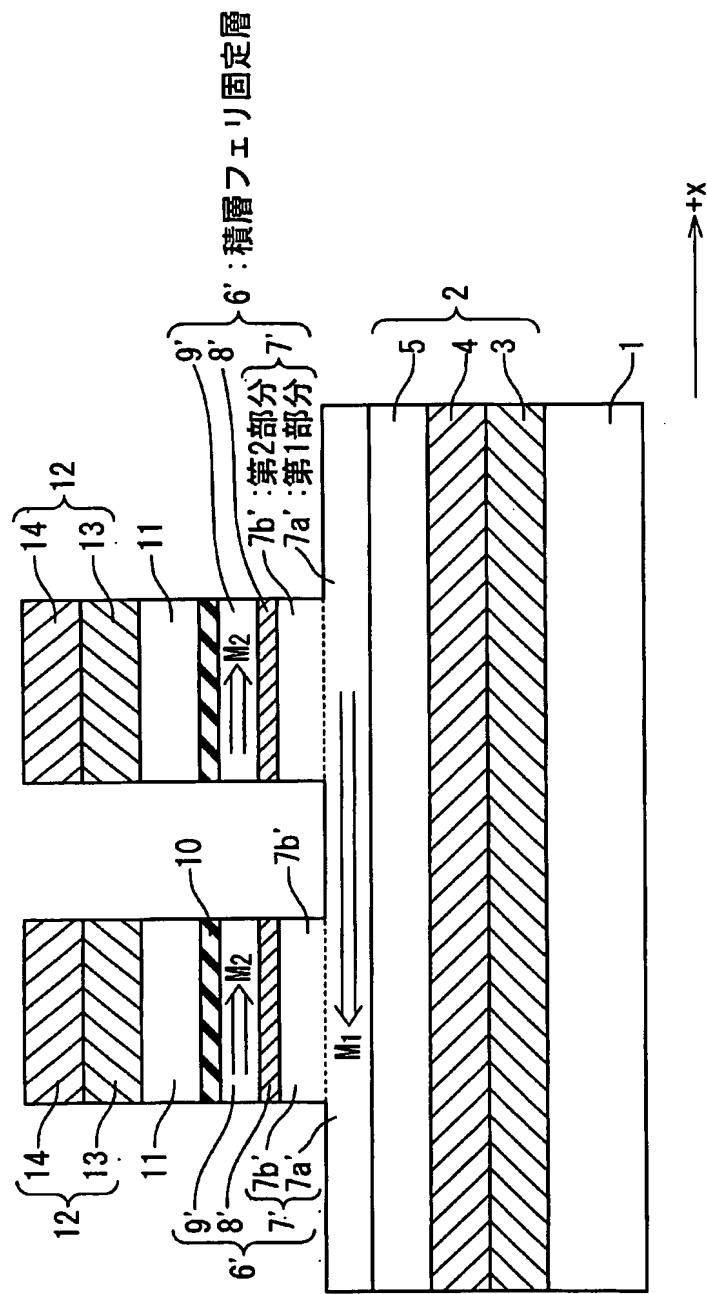


図 12

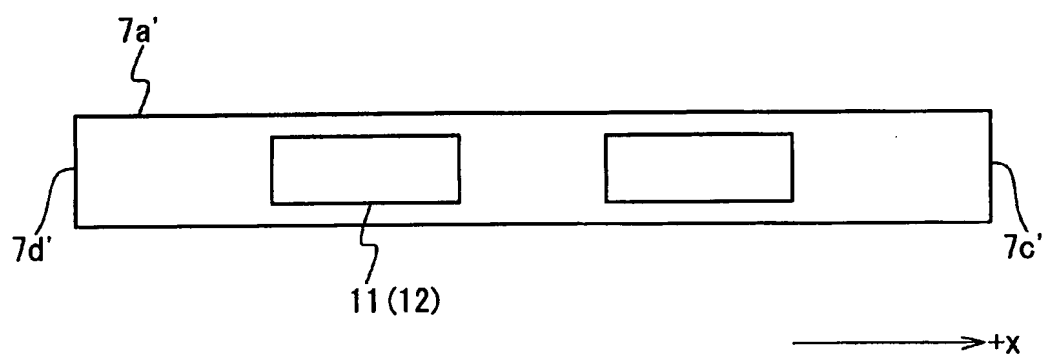


図13

